

## 研究快讯

# 对飞秒激光等离子体相互作用中横向箍缩的观察\*

李玉同<sup>1)2)</sup> 张 杰<sup>1)</sup> 陈黎明<sup>1)2)</sup> 夏江帆<sup>1)</sup> 腾 浩<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)</sup> 江文勉<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所光物理实验室,北京 100080)

<sup>2)</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)

(2000 年 3 月 7 日收到)

用飞秒激光的 Normaski 偏振干涉法,对超短激光脉冲产生的等离子体膨胀过程进行了光学诊断,得到了有时间分辨的等离子体干涉图.发现飞秒激光等离子体在靶面平行的方向上出现了箍缩,使等离子体膨胀呈 jet 结构,这种箍缩现象是由自生磁场对等离子体的约束所造成.

关键词:飞秒激光等离子体,光学诊断,电子密度分布

PACC: 5250J, 5225

激光等离子体中电子密度的空间分布和标尺长度对激光能量的吸收、各种参量不稳定性等许多物理过程都有着重要影响.因此,对电子密度的空间分布和标尺长度的诊断,特别是实时的诊断对激光等离子体相互作用中诸如有质动力引起的密度陡化、激光脉冲的成丝、等离子体的流体效应、快点火概念中的开通道及打洞效应等很多物理过程的研究是至关重要的.

本文用 Normaski 偏振干涉法对等离子体密度空间分布进行了直接测量.由于使用了飞秒级的激光探针,有效地冻结了等离子体的运动过程,实现了对飞秒激光等离子体流体力学过程时间分辨的实验研究,得到了不同时刻的等离子体干涉图和阴影图,观察到了自生磁场对等离子体的箍缩效应.

Normaski 偏振干涉仪的原理<sup>[1]</sup>见图 1. 偏振方向 45°(相对于垂直方向)的线偏振光从左面入射,

起偏器保证入射光为严格的线偏振.高质量物镜将等离子体像传递到像面上.探针光经过透镜后,在焦点处会聚,再以球面波向前发散.发散的球面波被 Wollaston 棱镜分成振幅相等、偏振方向分别为水平和垂直的两束光,这两束光的反向延长线分别在焦点上下会聚,如图 1 所示,这两点为两球面波前的球心.两束光经过置于像面前、与起偏器平行或垂直的检偏器后在像面上发生干涉.由图 1 可见,干涉条纹的宽度为

$$\Delta = \lambda \frac{R}{d} \quad d = l\theta, \quad (1)$$

其中  $R$  为透镜焦点到像面的距离,  $d$  为两球面波前球心间的距离,  $l$  为 Wollaston 棱镜到焦点的距离,  $\theta$  为 Wollaston 棱镜的分束角.在 Normaski 干涉仪中,调节干涉条纹的宽度非常容易,只需改变 Wollaston 棱镜的位置即可.

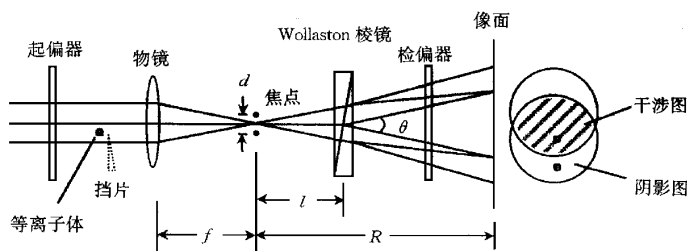


图 1 Normaski 偏振干涉仪原理图

\*国家自然科学基金(批准号:19825110)和国家高科技惯性约束聚变(ICF)基金资助的课题.

实验在中国科学院物理研究所光物理实验室的掺钛蓝宝石飞秒激光装置上进行,该激光器脉宽为 150 fs,输出能量为 5 mJ,重复频率为 10 Hz,波长为 800 nm. 实验布局见图 2. 从激光器输出的光束被分成打靶主光路和探针光路. 主光路由分光镜、全反镜  $M_2, M_3, M_4, M_5$ , 瞄准用孔径光阑、打靶透镜  $L_1$  组成. 其中  $M_3$  和  $M_4$  安装在一架行程 20 cm 的光学平移台上,用来调节与探针光的延迟时间,调节范围为 0—1200 ps. He-Ne 激光器 1 是整个实验布局的光路基准,首先用它来确定主光路光轴. 探针光路由分光镜  $M_6, M_7, M_8, M_9$ , 透镜  $L_2, L_3$ , 倍频晶体 BBO 和 Normaski 干涉仪组成. 凸透镜  $L_2$  和凹透镜  $L_3$  组成伽利略式扩束器,扩束比为 2:1. 晶体倍频后的 400 nm 激光束作为探针光,沿靶面平行方向穿过等离子体,进行密度和阴影诊断. He-Ne 激光管 2 用来模拟探针光光路. 在 Normaski 干涉仪中,一块  $f/3$  消色差透镜将放大 14 倍的等离子体像传递到 CCD 记录面上,透镜的收集角为 0.15 rad. 干涉仪的核心是一块分束角  $2^\circ$  的 Wollaston 棱镜. 两块  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  孔径、消光比优于  $10^{-5}$  的 Glan-Taylor 棱镜分别作为起偏器和检偏器. 实验中首先拍摄一幅无等离子体的干涉图作为参考. 改变主光路和探针光路的程差,可调节探针光相对于主脉冲的延迟时间,得到一系列不同时刻的等离子体图像.

实验中采用镀于玻璃底衬上的  $3 \mu\text{m}$  厚铝膜作靶,激光入射角为  $0^\circ$ ,靶面功率密度约为  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ . 靶台具有三维平动和一维转动. 实验采用单发打靶模式,每打一发后,靶台沿与入射激光垂直的方向平动 1 mm,确保激光每发都与新靶面作用. 16 比特、 $1152 \times 1242$  阵列的 CCD 相机动态范围为 65000,其像元为  $25 \mu\text{m}$ . 系统的时间分辨本领为探

针光的脉宽,约为 150 fs, CCD 像元大小限制的空间分辨本领约为  $2 \mu\text{m}$ . 实验中综合使用中性和干涉滤光片,可有效避免杂散光和等离子体自发光的干扰.

由于等离子体存在密度梯度,准平行探针光穿过等离子体后将发生偏折,偏转角为

$$\alpha = \int \nabla_{\perp} \eta dl, \quad (2)$$

其中  $\eta$  为等离子体的折射率. 如果等离子体横向折射率为常数,则所有光线的偏转角相同,在探测器上光强为均匀分布. 但在一般情况下,等离子体横向折射率是随空间变化的,所以不同光线偏转角不同,结果在探测面上光强出现明暗变化,形成阴影. 阴影图可反映等离子体的轮廓和空间尺度. 图 3 为主脉冲与等离子体作用后 0 ps 和 13 ps 时拍摄的等离子体阴影图. 由于靶面附近的等离子体密度高且梯度大,探针光被散射或折射出系统的接收立体角,所以靶面附近的等离子体阴影为全黑. 在离靶面较远的地方,探针光可以通过,呈现出由暗到亮的渐变过程.

在讨论实验所测电子密度之前,先对 400 nm 探针光所能诊断的等离子体密度上限进行估计. 众所周知,探针光只能在小于临界密度的等离子体中传播,而且会发生吸收和折射,所以实测电子密度值远低于探针光的临界密度值. 现在讨论折射效应对所测电子密度的限制. 由(2)式可知,探针光通过等离

子体后,其偏转角可近似为  $\alpha = \frac{n_e}{2n_c} \frac{l}{L}$ , 这里  $L$  为探针光在等离子体中所经过的路径,  $l$  为电子密度梯度标长,  $n_e$  为电子密度,  $n_c$  为临界密度. 所能测量的电子密度的上限为

$$n_e < \frac{2n_c L \theta}{l}, \quad (3)$$

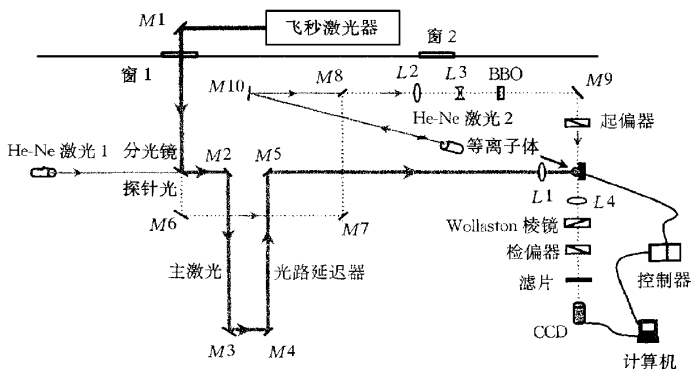


图 2 飞秒激光探针光学诊断实验装置图  $M$  为全反镜,  $L$  为透镜

$\theta$  为系统接收立体角. 在本实验中, 系统的接收立体角为  $\theta = 0.15 \text{ rad}$ , 取  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $l = 10 \mu\text{m}$ , 对于  $400 \text{ nm}$  探针光 ( $n_c = 6.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), 得到电子密度上限为  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 这在后面的实验中得到了证实.

探针光通过等离子体后, 等离子体引起的干涉条纹移动数为

$$N = \int_0^L \frac{\Delta\eta}{\lambda} dx = \frac{1}{2\lambda n_c} \int_0^L n_e dx, \quad (4)$$

其中  $\lambda$  为探针光波长,  $L$  为探针光在等离子体中的路径,  $\eta$  为等离子体折射率, 它可以进一步表示为  $\eta = (1 - n_e/n_c)^{1/2}$ ,  $n_c$  为探针光对应的临界密度. 要由 (4) 式得到等离子体的密度分布, 须使用 Abel 反演算法<sup>[21]</sup>. Abel 反演要求等离子体在  $z = z_0$  (对称轴选为  $z$ ) 的截面上为柱对称分布. 在我们的实验中, 从干涉图来看, 等离子体的确为非对称分布的. 所以, Abel 反演的使用条件并不太满足, 由此可能会造成一定的误差.

图 4 为实验所测典型等离子体干涉图及相应电

子密度分布, 对应时刻为主脉冲过后  $87 \text{ ps}$ . 实验中特别将干涉条纹的间距加大, 避免了等离子体内部的条纹密集问题. 图 4 中电子密度均用  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  为单位. 从实验所测一系列不同时刻的结果来看, 等离子体干涉图具有下面几个特点: (1) 随着时间的推移, 等离子体的密度梯度变缓, 对探针光的折射相应减弱, 等离子体内部的条纹逐渐显露出来. (2) 干涉条纹不是理想的轴对称分布, 随着时间的推移, 这种非对称性越来越明显. (3) 等离子体在横向, 即与靶面平行的方向出现箍缩, 造成了等离子体膨胀的 jet 结构, 这表明在横向存在某种约束. 当然, 激光焦斑的非均匀性可能会导致等离子体的非对称, 但不能解释密度的横向箍缩. 飞秒激光等离子体相互作用中, 会产生极强的准静态磁场<sup>[3,4]</sup>. 我们认为等离子体 jet 结构的形成是由强自生磁场的等离子体的约束所造成. 其他实验室也曾观察到类似现象<sup>[2,5,6]</sup>. 目前, 我们正在对此过程进行二维的粒子模拟研究, 期望从理论上对此过程有更为深入的理解.

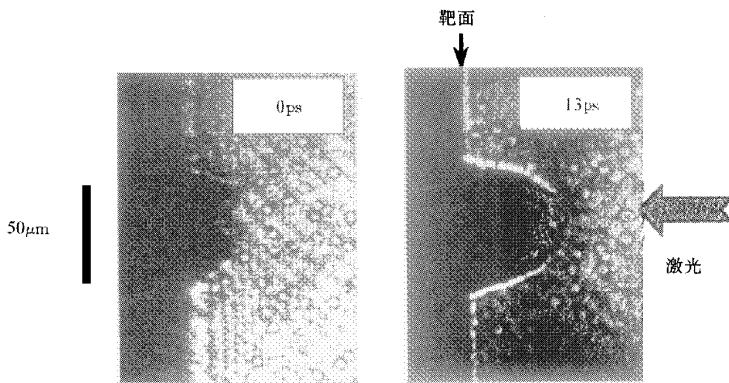


图 3 主脉冲过后 0 ps 和 13 ps 时的等离子体阴影图

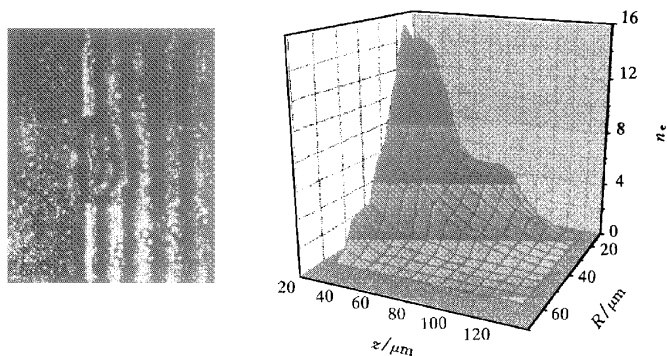


图 4 87 ps 时的等离子体干涉图和密度分布(电子密度单位为  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )

中国科学院物理研究所光物理实验室飞秒激光器运行组为本工作的顺利完成付出了大量心血,加拿大魁北克大学的江志明博士对实验提出了许多有益的建议,作者在此表示衷心的感谢。

- [1] R. Benattar, C. Popovics, R. Sigel, *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (1979), 1583.  
 [2] Y. T. Li, Ph. D. Thesis (China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 2000) [in Chinese] 李玉同, 博士学位论

文(中国工程物理研究院, 绵阳, 2000) ]

- [3] M. G. Haines, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998), 524.  
 [4] H. Ruhl, Y. Sentoku, K. Mima *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999), 743.  
 [5] M. Borghesi, A. J. Mackinnon, A. R. Bell *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998), 112.  
 [6] F. N. Beg, A. R. Bell, A. E. Dangor *et al.*, *Phys. Plasmas*, **4** (1997), 447.

## OBSERVATION OF THE TRANSVERSE PINCH OF THE EXPANSION OF AN FEMTOSECOND LASER-PLASMA\*

LI YU-TONG<sup>a,b)</sup> ZHANG JIE<sup>a)</sup> CHEN LI-MING<sup>a,b)</sup> XIA JIANG-FAN<sup>a)</sup> TENG HAO<sup>a)</sup> WEI ZHI-YI<sup>a)</sup> JIANG WEN-MIAN<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>b)</sup>(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 7 March 2000)

### ABSTRACT

Using Normaski polarization interference technique, the expansion process of a plasma generated by ultrashort laser pulses was optically diagnosed. Temporal resolved interferogram of the laser-plasma has been obtained. A strong pinch effect in the transverse dimension has been observed for a jet expansion of the laser-plasma. It is found that the pinch effect was due to the confinement of the magnetic fields generated in the laser-plasma.

**Keywords**: femtosecond laser-plasmas, optical diagnostics, distribution of electron density

**PACC**: 5250J, 5225

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19825110) and the Inertial Confinement Fusion Foundation of the China National High Technology Development Program.